

北海道大学
HOKKAIDO UNIVERSITY

コンピュータシステム (アーキテクチャ 第5回)



工学部 情報エレクトロニクス学科
大学院 情報科学研究院 情報理工学部門
堀山 貴史

前回(アーキテクチャ第4回)の内容

機械語命令と内部動作(3)

- サブルーチンコール、算術式とスタック

アーキテクチャの基本知識(2)
(メインフレームの発展)

- マイクロプログラム
 - エミュレーション、ファームウェア
- メインフレーム互換機
- 仮想メモリ、仮想マシン
- ベクトル計算機、並列計算機
 - スーパーコンピュータ
 - パイプライン処理とマルチプロセッシング、並行と並列
- CISC と RISC



コンピュータシステム
写真は Wikipedia FACOM M380より

今回の内容

アーキテクチャの基本知識(3)
(マイクロプロセッサ以降)

1. マイクロプロセッサの登場:
 - 集積回路技術、電卓~4ビットマイコン、
2. マイクロプロセッサの進化:
 - メモリ大容量化・8ビット機から64ビット機へ
3. Apple 対 MS DOS / Windows (?)
 - x86アーキテクチャ、インテル-マイクロソフト-DOS/V/マシン、モトローラ-IBM-アップル
4. UNIXとワークステーションの登場:
 - ワークステーション-UNIX-互換PC-Linux
5. Google登場:
 - Webとインターネット、google-ARM-Android、携帯-スマホ
6. ムーアの法則
 - マイクロプロセッサ技術の限界



写真は Wikipedia Intel 4004より

1. マイクロプロセッサの登場



皆さんが使っている
パソコンの CPU も
ここから進化しました

Intel 4004 (1971年 発表)
世界最初期の 4 bit マイクロプロセッサ
クロック周波数: 500~741 kHz
2,300 トランジスタ

アーキテクチャ #5 コンピュータシステム 4
写真は Wikipedia Intel 4004より

集積回路技術

- トランジスタは真空管より圧倒的に省電力で、寿命も長い
 - たくさんのスイッチを使って複雑な回路を安定動作できる
 - ただし、配線が非常に多くなると信頼性が低下する (ハンダづけの劣化・接触不良・配線ミスなど)
 - プリント基板 (合成樹脂の板に銅箔を切り貼りして配線したものにトランジスタや抵抗などを取り付け) → マザーボード



アーキテクチャ #5 コンピュータシステム 5
写真は Wikipedia トランジスタより

集積回路技術

- トランジスタは真空管より圧倒的に省電力で、寿命も長い
 - たくさんのスイッチを使って複雑な回路を安定動作できる
 - ただし、配線が非常に多くなると信頼性が低下する (ハンダづけの劣化・接触不良・配線ミスなど)
 - プリント基板 (合成樹脂の板に銅箔を切り貼りして配線したものにトランジスタや抵抗などを取り付け) → マザーボード
- IC (Integrated Circuit; 集積回路)
 - 半導体基板に複数トランジスタを合成し密封したもの (1958年~)
 - 印刷技術を応用して、版画のように量産する技術が出現 (1970年頃~) (1個あたりの製造コストが低下。信頼度が向上)
 - 微細加工技術が進歩し、集積度が向上。(1980年代~2000年以降)
配線幅がミクロン(μm; 1000分の1ミリ)以下に (チップのトランジスタ数↑)
 - LSI (Large-Scale IC) から VLSI (Very Large-Scale IC) へ進化
近年は数百万個のトランジスタを数ミリ角のシリコンチップに集積



アーキテクチャ #5 コンピュータシステム 6
写真は Wikipedia トランジスタより

メモリの大容量化

- RAM (Random Access Memory) の分類:
 - **SRAM (Static RAM)**: 電子回路で0/1を記憶する。電源を切るまで内容は消えない。内部構造が複雑になるので、集積度の面では不利。
 - **DRAM (Dynamic RAM)**: 電極に充電することで0/1を記憶する。時間がたつと放電して消えるので、一定周期で再充電(リフレッシュ)する必要がある。内部構造が単純なので集積度の面では有利。

アーキテクチャ #5 コンピュータシステム 13

メモリの大容量化

- RAM (Random Access Memory) の分類:
 - **SRAM (Static RAM)**: 電子回路で0/1を記憶する。電源を切るまで内容は消えない。内部構造が複雑になるので、集積度の面では不利。
 - **DRAM (Dynamic RAM)**: 電極に充電することで0/1を記憶する。時間がたつと放電して消えるので、一定周期で再充電(リフレッシュ)する必要がある。内部構造が単純なので集積度の面では有利。
- 1970年代以降、大容量DRAMの開発競争が進んだ
 - 1Kビット (インテル; 1970年) → 4Kビット (TI社; 1973年) → 16Kビット (Mostek社; 1975年) **「ムーアの法則」**
 - 1980年代: 日本の半導体メーカーの躍進; 国が育成し、64Kビット、256Kビットで世界シェア90%以上に。日米半導体摩擦が深刻化
 - 1990年代: 1Mb → 4Mb → 16Mb → 64Mb と大規模化・微細化が進む (1997年頃からは韓国企業が台頭し日本企業は凋落)
 - 2000年以降: 128Mb → 256Mb → 512Mb → 1Gb → 2Gb
微細化技術が限界に近づき、大容量化のペースが鈍る

アーキテクチャ #5 コンピュータシステム 14

計算機のビット幅

- nビットプロセッサでは、1ワード = nビット**
 - 1ワードは、主記憶の1つの番地を指定して、1度にロードまたはストアするときのデータのビット幅(→ データバス幅)
 - (注)何ビットマシンでも、1バイト=8ビット
- 機械語命令のビット幅: 多くの場合1ワード
 - 可変長で2~3ワードの命令を持つ場合もある
 - 例えば、8ビットプロセッサでも16ビット命令を持つことがある
- レジスタのビット幅: 原則として1ワード

アーキテクチャ #5 コンピュータシステム 15

計算機のビット幅

- nビットプロセッサでは、1ワード = nビット**
 - 1ワードは、主記憶の1つの番地を指定して、1度にロードまたはストアするときのデータのビット幅(→ データバス幅)
 - (注)何ビットマシンでも、1バイト=8ビット
- 機械語命令のビット幅: 多くの場合1ワード
 - 可変長で2~3ワードの命令を持つ場合もある
 - 例えば、8ビットプロセッサでも16ビット命令を持つことがある
- レジスタのビット幅: 原則として1ワード
- 演算器のビット幅: 1ワードの場合が多い
 - 2ワード分の桁数の2進数が対象の、機械語命令の演算を持つ場合もある
- 主記憶の番地を参照するビット幅(アドレスバス幅):
 - 1ワードのデータバス幅と一致しないことがある
 - (例) 8ビットレジスタを2個つなげて16ビットの番地を指定する
 - (例) 32ビットのうち下位24ビットだけを使ってメモリ番地を表す

アーキテクチャ #5 コンピュータシステム 16

8ビット機から64ビット機へ

- 8ビットマイクロプロセッサ: (1975年~)**
(インテル系とモトローラ系がシェアを争った)
 - **インテル8080系**
ザイログ社 Z80 (1976年): 8080開発チームが設計開発。シャープやNECのPCを始め、アーケードゲーム機などで広く使われた。今も組込み用途でZ80互換チップが見られる。
 - **モトローラ6800系**
モス社6502(1975年): MC6800の仕様を簡素化したプロセッサ。Apple-IIや任天堂ファミリーコンピュータで採用。
MC6809(1979年): 富士通のPCやアーケードゲーム機で採用
- 16ビットCPU(1980年~)**
 - **インテル8086 (1978年)**: x86ファミリーの元祖。
- 32ビットCPU (1985年~)**
 - **インテル80386、モトローラ68020**以降、32ビット時代が長期間続く
- 64ビットCPU(2000年代~)** 2GB以上の主記憶を扱うため必要

アーキテクチャ #5 コンピュータシステム 17

脱線: 8ビットCPU (モトローラ6800系) と世界最初のPC と大ヒットゲーム機

Apple-II
CPU MOS 6502, 8bit, 1MHz, 1977



世界で初めての「真の」個人用計算機(PC)
 ・ モニタ
 ・ グラフィックス
 ・ BASIC言語、アセンブラ
 ・ ソフトウェア
 ・ フロッピードライブ...

買ったらずぐに使えた(組立て無し)

Nintendo ファミコン
CPU MOS6502, 8bit, 1983 (リコーRP2A03)



世界で約6,000万台出荷
 ・ ROMカセット
 ・ ゲームタイトル
 ✓ ドンキーコング、
 ✓ マリオブラザーズ

☆ 世界最初期の家庭用ゲーム機はアタリ社の「ホーム・ボン」(1975年) 写真はWikipedia Apple II, ファミリーコンピュータより

MOS6502は、MC6800の同系CPU

休憩

- ここで、少し休憩しましょう。
- 深呼吸したり、肩の力を抜いてから、次のビデオに進んでください。

今回の内容 **アーキテクチャの基本知識(3)**
(マイクロプロセッサ以降)

1. **マイクロプロセッサの登場:**
- 集積回路技術、電卓~4ビットマイコン、
2. **マイクロプロセッサの進化:**
- メモリ大容量化・8ビット機から64ビット機へ
3. **Apple 対 MS DOS / Windows (?)**
- x86アーキテクチャ、インテル-マイクロソフト-DOS/Vマシン、モトローラ-IBM-アップル
4. **UNIXとワークステーションの登場:**
- ワークステーション-UNIX-互換PC-Linux
5. **Google登場:**
- Webとインターネット、google-ARM-Android、携帯-スマホ
6. **ムーアの法則**
- マイクロプロセッサ技術の限界



3. Apple 対 MS DOS / Windows (?)

Apple PCと
モトローラ系プロセッサ



intel

MS DOS/Window PCと
インテル系プロセッサ

x86 アーキテクチャ

- **インテルのマイクロプロセッサシリーズ**
当初 80x86という型番だったのでx86 と呼ばれる。
上位互換性で圧倒的シェアを獲得。インテルはマイクロプロセッサの巨人に
 - 16ビット 8086(1978年) 80186(1982年) 80286(1984年)
 - 32ビット 80386(1985年) 80486(1989年) Pentium(1993年)
Pentium-Pro(1995年) -II(1997年), -III(1999年), -4(2000年)
 - 64ビット Itanium(2001年~) Core2, Xeon(2006年~)

x86 アーキテクチャ

- **インテルのマイクロプロセッサシリーズ**
当初 80x86という型番だったのでx86 と呼ばれる。
上位互換性で圧倒的シェアを獲得。インテルはマイクロプロセッサの巨人に
 - 16ビット 8086(1978年) 80186(1982年) 80286(1984年)
 - 32ビット 80386(1985年) 80486(1989年) Pentium(1993年)
Pentium-Pro(1995年) -II(1997年), -III(1999年), -4(2000年)
 - 64ビット Itanium(2001年~) Core2, Xeon(2006年~)
- **インテル互換チップ(セカンドソース)**
 - 16ビット (NEC) V20, V25, V30 (V40以降は独自アーキテクチャ)
 - 32ビット (AMD社) Am386, 486, K5, K6, K7, Duron, Athlon
 - 64ビット (AMD社) Athlon64, Opteron(2003年~)
- **インテルは AMDを著作権侵害で訴え争ったが後に和解**
 - 64ビット命令セット (IA-64) はインテルが Itanium で先に発表したのが、AMD社が独自拡張した命令セット(x86-64)のOpteronに市場競争で敗れ、インテルはCore2, XeonではAMDの命令セットを採用した

マイクロプロセッサ と IBM PC互換機

- **IBMは、1980年代から米国内の家庭用PCの市場にも参入**
 - **IBM PC/AT**(The Personal Computer for Advanced Technologies 5170) (1986年)が大ヒット (→ 表計算ソフトで税金の確定申告ができる)
 - 本業のメインフレームではなかったので、安価な市販部品を利用
 - **インテルのx86系プロセッサを採用**
 - **マイクロソフトのPC用OS「MS-DOS」を採用**
 - **マザーボードの仕様をオープン化(PC周辺機器の標準化が進む)**
 - **PC/AT互換機メーカーが出現(IBM-PC互換機とも呼ぶ)**
 - 当初はIBMは互換機メーカーと争っていたが、後にPC事業から撤退
→ PC/AT互換機の標準規格だけが世界中に広まった

マイクロプロセッサ と IBM PC互換機

- IBMは、1980年代から米国内の家庭用PCの市場にも参入
 - IBM PC/AT(The Personal Computer for Advanced Technologies 5170) (1986年)が大ヒット (→ 表計算ソフトで税金の確定申告ができる)
 - 本業のメインフレームではなかったため、安価な市販部品を利用
 - インテルのx86系プロセッサを採用
 - マイクロソフトのPC用OS「MS-DOS」を採用
 - マザーボードの仕様をオープン化(PC周辺機器の標準化が進む)
 - PC/AT互換機メーカーが出現(IBM-PC互換機とも呼ぶ)
 - 当初はIBMは互換機メーカーと争っていたが、後にPC事業から撤退
 - PC/AT互換機の標準規格だけが世界中に広まった
- マイクロソフト Windows と インテルのマイクロプロセッサがPC分野で圧倒的なシェアを獲得 (→ Wintel 連合と呼ばれた)
 - 日本では、1993年頃まではNECのPC9800シリーズのシェアが圧倒的で、PC/AT互換機の普及は遅れた。(ただしどちらもWintelだが)
 - 日本IBM が日本語OS「DOS/V」(1990年)を発表してからPC/AT互換機が普及 (→ 日本ではDOS/Vマシンとも呼ばれた)

アーキテクチャ #5 コンピュータシステム 25

モトローラ系プロセッサ と Apple PC

- 先進的なPCを世に出すため、スティーブ ジョブズらが アップル社を設立 (1977年)
 - Apple II(1978年): 世界初のオールインワン型PC
キーボードとCRTモニター、フロッピーディスク、モトローラ系6502プロセッサ
 - Macintosh(1984年~): マウスによるGUI(Graphic User Interface) MS-DOSのようなコマンド型のOSしかなかった時代に、先駆的なPCを出荷。高所得者層に普及
 - 使用プロセッサ: モトローラ680x0プロセッサ
MC68000 → 68010 → 68020 → 68030 → 68040
 - その後、アップル・モトローラ・IBMが提携して新型プロセッサを開発
1994年に「PowerPC」プロセッサを搭載(68系と命令互換性なし)

アーキテクチャ #5 コンピュータシステム 26
写真は Wikipedia Steve Jobs, Apple II, Macintosh, iMac より

モトローラ系プロセッサ と Apple PC

- 先進的なPCを世に出すため、スティーブ ジョブズらが アップル社を設立 (1977年)
 - Apple II(1978年): 世界初のオールインワン型PC
キーボードとCRTモニター、フロッピーディスク、モトローラ系6502プロセッサ
 - Macintosh(1984年~): マウスによるGUI(Graphic User Interface) MS-DOSのようなコマンド型のOSしかなかった時代に、先駆的なPCを出荷。高所得者層に普及
 - 使用プロセッサ: モトローラ680x0プロセッサ
MC68000 → 68010 → 68020 → 68030 → 68040
 - その後、アップル・モトローラ・IBMが提携して新型プロセッサを開発
1994年に「PowerPC」プロセッサを搭載(68系と命令互換性なし)
 - その後、1998年頃まではアップルの低迷期(絶滅が危惧された)
 - 1998年にジョブズが復帰、i-Macを発表
(USBポートに統一、フロッピードライブを初めて廃止)
 - iPod, iPhone, iPad で音楽・出版サービスとPCを融合
 - 2006年以降、PowerPCからインテルの x86系プロセッサに

アーキテクチャ #5 コンピュータシステム 27
写真は Wikipedia Steve Jobs, Apple II, Macintosh, iMac より

4. UNIXとワークステーションの登場




ビル・ジョイ(William N. Joy, 1954-)
BSD Unixの初期の開発者
Sun microsystems社の伝説的エンジニア
1986にBSD Unixの開発で、
ACM Grace Murray Hopper Award 受賞

アーキテクチャ #5 コンピュータシステム 29
写真は Wikipedia Bill Joy より

ミニコンピュータ から ワークステーション へ

- 1970~80年代: 集積回路技術の進歩により、少し前のメインフレーム機並みの高性能計算機を小規模オフィス(大学の研究室などに)置けるようになった → ミニコンピュータと呼ばれた
 - DEC社の PDP-8, PDP-11 が代表的機種
(ミニと言っても大型冷蔵庫くらいの大きさ)
 - 1970年頃にAT&Tベル研究所で UNIX OS が開発され、ミニコンピュータの標準的なOSとして広まった

アーキテクチャ #5 コンピュータシステム 30
写真は Wikipedia PDP-11, Sun-3 より

ミニコンピュータ から ワークステーション へ

- 1970~80年代: 集積回路技術の進歩により、少し前のメインフレーム機並みの高性能計算機を小規模オフィス(大学の研究室などに)置けるようになった → ミニコンピュータと呼ばれた
 - DEC社の PDP-8, PDP-11 が代表的機種
(ミニと言っても大型冷蔵庫くらいの大きさ)
 - 1970年頃にAT&Tベル研究所で UNIX OS が開発され、ミニコンピュータの標準的なOSとして広まった
- 1980年代後半: マイクロプロセッサ技術でさらに小型化しデスクトップ型に → UNIXワークステーションと呼ばれた
 - 特徴: UNIX OS, X-window(GUI), 高性能CPU、大容量メモリ
 - Sun Microsystems社: Sun-1(1982年), Sun-2(1983年), Sun-3(1985年), MC680x0プロセッサ → SparcStation-1, -2, -10(1989年~)
 - SPARC: Sunが設計して富士通などが製造したRISCチップ
 - SONYワークステーションNEWS(1987年~93年)
 - DEC社 Alpha Station(1994年), Silicon Graphics社 Indy(1993年)

アーキテクチャ #5 コンピュータシステム 31
写真は Wikipedia PDP-11, Sun-3 より

ミニコンピュータ から ワークステーション へ

- 1970~80年代: 集積回路技術の進歩により、少し前のメインフレーム機並みの高性能計算機を小規模オフィス(大学の研究室などに)置けるようになった → **ミニコンピュータと呼ばれた**
 - DEC社の PDP-8, PDP-11 が代表的機種 (ミニと言っても大型冷蔵庫くらいの大きさ)
 - 1970年頃にAT&Tベル研究所で UNIX OS が開発され、ミニコンピュータの標準的なOSとして広まった
- 1980年代後半: マイクロプロセッサ技術でさらに小型化しデスクトップ型に → **UNIXワークステーションと呼ばれた**
 - 特徴: UNIX OS, X-window(GUI), 高性能CPU、大容量メモリ
 - Sun Microsystems社: Sun-1(1982年), Sun-2(1983年), Sun-3(1985年), MC680x0プロセッサ → SparcStation-1, -2, -10(1989年~)
 - SPARC: Sunが設計して富士通などが製造したRISCチップ
 - SONYワークステーションNEWS(1987年~93年)
 - DEC社 Alpha Station(1994年), Silicon Graphics社 Indy(1993年)
- 2000年頃: PC/AT互換機(+Linux OS)の性能が向上し、ワークステーションとの違いがほぼなくなった**

PDP-11 (1970年)

Sun-3/60 (1985年)
CPU: 20 MHz
メモリ: 24 MB

アーキテクチャ #5 コンピュータシステム 32 写真は Wikipedia PDP-11, Sun-3 より

休憩

- ここで、少し休憩しましょう。
- 深呼吸したり、肩の力を抜いてから、次のビデオに進んでください。

アーキテクチャ #5 コンピュータシステム 33

今回の内容

アーキテクチャの基本知識(3)
(マイクロプロセッサ以降)

- マイクロプロセッサの登場:**
 - 集積回路技術、電卓~4ビットマイコン、
- マイクロプロセッサの進化:**
 - メモリ大容量化・8ビット機から64ビット機へ
- Apple 対 MS DOS / Windows (?)**
 - x86アーキテクチャ、インテル-マイクロソフト-DOS/Vマシン、モトローラ-IBM-アップル
- UNIXとワークステーションの登場:**
 - ワークステーション-UNIX-互換PC-Linux
- Google登場:**
 - Webとインターネット、google-ARM-Android、携帯-スマホ
- ムーアの法則**
 - マイクロプロセッサ技術の限界

34 写真は Wikipedia Intel 4004 より

アーキテクチャ #5 コンピュータシステム

5. Google 登場

ラリー・ページとセルゲイ・ブリンが
スタンフォード大学で出会い、
1998年に Google Inc. 設立

アーキテクチャ #5 コンピュータシステム 35 写真は Wikipedia Larry Page, Sergey Brin より

インターネット と Webの影響

- 1985年~1995年頃までは個人用PCでまともにGUI操作ができるのはMacintoshだけだった
 - 1990年にマイクロソフトは MS-DOS に GUI を追加したWindows 3.1を発売したが、Macに大きくする見劣りする使い勝手だった
- Web ブラウザが出現**
NCSA Mosaic(1992年)、Netscape(1994年):
**マウスでリンクをクリックするだけで楽しめる
画期的なGUIソフトウェア**

Marc Andreessen (1971年生)
イリノイ大在学中に NCSA Mosaic を開発
1994年に23才で Netscape を開発

アーキテクチャ #5 コンピュータシステム 36 写真は Wikipedia Marc Andreessen より

インターネット と Webの影響

- 1985年~1995年頃までは個人用PCでまともにGUI操作ができるのはMacintoshだけだった
 - 1990年にマイクロソフトは MS-DOS に GUI を追加したWindows 3.1を発売したが、Macに大きくする見劣りする使い勝手だった
- Web ブラウザが出現**
NCSA Mosaic(1992年)、Netscape(1994年):
**マウスでリンクをクリックするだけで楽しめる
画期的なGUIソフトウェア**
- マイクロソフトが Window95 を発売**
(その後、Windows98, XP, 7に続く)
- TCP/IP通信モジュールを標準装備、
Webブラウザ(Internet Explorer)を添付 (→ ブラウザ戦争)
→ **爆発的にシェアを拡大**。Macの凋落が始まる
- 落ち目のAppleが復活したきっかけは **2001年以降のインターネット
音楽配信、その後PCと携帯を融合してスマホに進出**

Marc Andreessen (1971-)
イリノイ大在学中に NCSA Mosaic を開発
1994年に23才で Netscape を開発

アーキテクチャ #5 コンピュータシステム 37 写真は Wikipedia Marc Andreessen より

Yahoo から Google へ

- Webブラウザの普及 → 電話帳に相当する案内サイトが必要
→ **Yahoo!** が成功を収める
 - 世界中の人が便利に使うポータルサイトを提供し、**広告を取ってビジネス化**



アーキテクチャ #5 コンピュータシステム 38

図は Internet Archive に保存されている 1996 年当時の Yahoo! トップページより

Yahoo から Google へ

- Webブラウザの普及 → 電話帳に相当する案内サイトが必要
→ **Yahoo!** が成功を収める
 - 世界中の人が便利に使うポータルサイトを提供し、**広告を取ってビジネス化**
- より高度なキーワード検索サイトとして **Google** が成功を収める
 - 広告ビジネスモデル**であることはYahoo!と同様
 - インターネットの世界的な普及で莫大な広告収入を獲得し、自分の資金で何でもやりたいことができる状態に
 - 世界中の検索データを集める、地理データを集める、出版データを集める、ビデオを集める、スケジュール情報を集める、電子メールサービス、ストレージ、TV会議、自動翻訳、etc.

アーキテクチャ #5 コンピュータシステム 39

Yahoo から Google へ

- Webブラウザの普及 → 電話帳に相当する案内サイトが必要
→ **Yahoo!** が成功を収める
 - 世界中の人が便利に使うポータルサイトを提供し、**広告を取ってビジネス化**
- より高度なキーワード検索サイトとして **Google** が成功を収める
 - 広告ビジネスモデル**であることはYahoo!と同様
 - インターネットの世界的な普及で莫大な広告収入を獲得し、自分の資金で何でもやりたいことができる状態に
 - 世界中の検索データを集める、地理データを集める、出版データを集める、ビデオを集める、スケジュール情報を集める、電子メールサービス、ストレージ、TV会議、自動翻訳、etc.
- Googleによる携帯端末・OSの開発
 - Android OS (Linux派生の組込み用OS)**を公開
 - 圧倒的多数のスマホ・タブレットで採用。ARMアーキテクチャの組込み系プロセッサが使われている。(Wintelの天下が Android-ARM により崩されかけている)

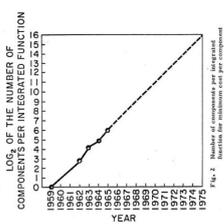
アーキテクチャ #5 コンピュータシステム 40

6. ムーアの法則

- 「18か月ごとに、トランジスタ数は倍になる」
- Gordon Moore が 1965年に発表した経験則



Gordon E. Moore (1929-) Intel 創業者の1人 現名誉会長 IEEE Medal of Honor受賞



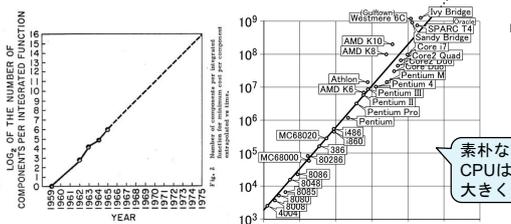
41 https://www.intel.com/pressroom/kits/events/moores_law_40th/
<https://www.chiphistory.org/20-moores-law-original-draft-1965-yui/> 図は

6. ムーアの法則

- 「18か月ごとに、トランジスタ数は倍になる」
- Gordon Moore が 1965年に発表した経験則



Gordon E. Moore (1929-) Intel 創業者の1人 現名誉会長 IEEE Medal of Honor受賞



素朴な疑問：
CPUは、どこまでも大きく、速くなるの？

42 図は Wikipedia ムーアの法則 https://www.intel.com/pressroom/kits/events/moores_law_40th/
<https://www.chiphistory.org/20-moores-law-original-draft-1965-yui/>

マイクロプロセッサ技術の限界

- 微細加工技術の限界**: 配線幅が光の波長に近づいている
 - 写真製版の原理を使うので、光の波長より細かい線を書けない
 - 紫外線やX線の露光も使っているが製造コストが上昇
- クロック周波数の限界**: 1クロックで光が進む距離が数センチに
 - クロック周期内に次のスイッチに信号を伝えるのが困難に
 - 周波数が高くなると、電磁波になって出て行ったり、微細配線間に生じるコンデンサの充放電で信号波形が乱れて減衰する
- 発熱の限界**: 半導体基板が発熱で融けてしまう
 - 面積あたりの発熱量(消費電力)が目玉焼きを焼くフライパンより高くなっている。電圧を下げると発熱は減るが速度が低下する

アーキテクチャ #5 コンピュータシステム 43

マイクロプロセッサ技術の限界

- ・ **微細加工技術の限界**: 配線幅が光の波長に近づいている
 - 写真製版の原理を使うので、光の波長より細かい線を書けない
 - 紫外線やX線での露光も使っているが製造コストが上昇
- ・ **クロック周波数の限界**: 1クロックで光が進む距離が数センチに
 - クロック周期内に次のスイッチに信号を伝えるのが困難に
 - 周波数が高くなると、電磁波になって出て行ったり、微細配線間に生じるコンデンサの充放電で信号波形が乱れて減衰する
- ・ **発熱の限界**: 半導体基板が発熱で融けてしまう
 - 面積あたりの発熱量(消費電力)が目玉焼きを焼くフライパンより高くなっている。電圧を下げると発熱は減るが速度が低下する
- ・ **これ以上、集積度やクロック周波数を上げるのは、物理的・経済的に難しい**
 - シリコンチップを複数並べたマイクロプロセッサや、分散並列アーキテクチャ、計算機クラスター、など様々な工夫が模索されている
 - 20世紀後半のように同じ価格で何百倍改善というのはもう難しい

アーキテクチャ #5

コンピュータシステム

44

今回のまとめ

アーキテクチャの基本知識(3) (マイクロプロセッサ以降)

1. **マイクロプロセッサの登場**:
 - 集積回路技術、電卓~4ビットマイコン、
2. **マイクロプロセッサの進化**:
 - メモリ大容量化・8ビット機から64ビット機へ
3. **Apple 対 MS DOS / Windows (?)**
 - x86アーキテクチャ、インテル-マイクロソフト-DOS/Vマシン、モトローラ-IBM-アップル
4. **UNIXとワークステーションの登場**:
 - ワークステーション-UNIX-互換PC-Linux
5. **Google登場**:
 - Webとインターネット、google-ARM-Android、携帯-スマホ
6. **ムーアの法則**
 - マイクロプロセッサ技術の限界



写真は Wikipedia Intel 4004 より